纤维直径与纤维毡面密度对玄武岩纤维复合板材力学性能影响研究*

王雪[1] 罗浩[1] 李全明[2] 王莹[1] 李菁华[1] 房圣博[2]

（1.中国第一汽车股份有限公司高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013；2.吉林大学材料科学与工程学院，长春 130025）

【欢迎引用】王雪，罗浩，李全明，等. 纤维直径与纤维毡面密度对玄武岩纤维复合板材力学性能影响研究[J]. 汽车文摘，2026(7): 1-6.

【Cite this paper】WANG X, LUO H, LI Q M, et al. Effect of Fiber Diameter and Fiber Mat Areal Density on the Mechanical Properties of Basalt Fiber Composite Panels[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(7): 1-6.

【摘要】为了支撑玄武岩复合材料在汽车领域的应用开发，制备了不同规格的玄武岩纤维复合板材，研究了不同厚度、不同面密度玄武岩纤维复合材料的弯曲性能、拉伸性能等力学性能，分析了纤维直径与纤维毡面密度对玄武岩纤维复合板材力学性能的影响。研究结果表明，板材横向性能均优于纵向性能，且在相同条件下，增大纤维毡面密度、减小板材厚度均可提升力学性能并降低吸水率；减小玄武岩纤维直径可改善力学性能，但对吸水率影响较小。

关键词：玄武岩纤维复合材料；力学性能；吸水率

中图分类号：U465.6；TB332　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240295

Effect of Fiber Diameter and Fiber Mat Areal Density on the Mechanical Properties of Basalt Fiber Composite Panels

Wang Xue[1], Luo Hao[1], Li Quanming[2], Wang Ying[1], Li Jinghua[1], Fang Shengbo[2]

（1. National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, China FAW Group Corporation Limited, Changchun 130013; 2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130015）

【Abstract】To support the application and development of basalt fiber composites in the automotive products, this study investigates the mechanical properties including flexural and tensile properties of basalt fiber composites with different thicknesses and areal densities. The effects of fiber diameter and fiber mat areal density on the mechanical properties of basalt fiber composite panels are analyzed. The results indicate that the transverse properties of the boards are superior to their longitudinal properties. Under the same conditions, increasing the area density of the fiber mat and reducing the board thickness can both improve the mechanical properties and reduce the water absorption rate. Furthermore, decreasing the diameter of the basalt fibers can improve the mechanical properties, but has a minor effect on the water absorption rate.

Key words: Basalt fiber composite material, Mechanical properties, Water absorption

0 引言

玄武岩纤维是一种新型的绿色无机高性能材料，其生产过程不产生有毒物质，废气、废水、废渣排放[1]。玄武岩纤维可降解为土壤母质，无二次污染，被称为“21世纪绿色工业材料”[2]，是我国重点发展的纤维材料之一[3-4]。玄武岩纤维兼具碳纤维的优异力学性能和玻璃纤维的低成本优势，具有较高的性价比[5]。此外，玄武岩纤维具有优异的热稳定性、耐腐蚀性、耐磨性[6]、耐高温性能以及环保性[7]。玄武岩纤维与树脂制备的复合材料具有高强度、高模量、低吸水率、保温、隔热、隔音等优异性能[8-9]，因此广泛应用于航空航天、

*基金项目：汽车用环保型玄武岩纤维复合材料开发及产业化研究（20220301020CX）。

军工、汽车工业等领域[10-12]。

目前，用针刺工艺成型的纤维毡复合材料是行李箱侧护面的主流方案，其基材多以麻纤维毡、聚丙烯（PolyPropylene，PP）或聚对苯二甲酸乙二醇酯（Polyethylene glycol Terephthalate，PET）纤维毡为主。麻纤维毡气味大、易发霉，吸水率达8%~12%，且其发霉、吸水后易发生变形，导致力学性能、耐久性大幅降低[13]。PP、PET纤维毡均采用化工纤维，存在气味大、对环境不友好、部件整体强度差的问题[14]。玄武岩纤维可与PP纤维等热塑性纤维结合，采用非织造工艺，制备具有优异力学性能、隔音、低吸水率、轻量化的玄武纤维复合材料板材[15]，充分发挥玄武岩纤维高性能、绿色环保等属性。该材料符合汽车材料向高性能发展的要求[16]，也符合国家对于汽车材料绿色环保的需求[17]，在汽车行业中具有良好的应用前景[18]。基于此，本文重点分析了玄武岩纤维直径、玄武岩纤维复合板材面密度、板材厚度的变化对玄武岩纤维复合材料性能的影响，以期为汽车部件选材和设计提供参考。

1 试验原料及仪器设备

1.1 试验原料

本试验使用的玄武岩纤维直径为13~17 μm，长度为(60±5) mm；PP纤维直径为5 μm，长度为(60±5) mm。

1.2 仪器设备

本研究使用的主要测试设备型号包括针刺机、电子天平（型号为FA1104N）、电热恒温鼓风干燥箱（型号为DHG-9000）、万能力学试验机（型号为WDW）、框架式伺服液压机（型号为SHP96-315）以及接触式加热烘箱。

2 玄武岩纤维复合材料制备

2.1 毡材制备

将比重为40%的改性玄武岩纤维与比重为60%的PP纤维依次经过开松机、混料机、梳理机、铺网以及多道针刺机进行工艺处理，通过调节单位面积纤维质量，制备不同面密度的复合纤维毡。复合材料具体制备工艺流程如图1所示。

2.2 板材的制备

首先将制备的复合纤维毡放置于90 ℃的电热恒温鼓风干燥箱中干燥0.5~1 h，以去除纤维毡中的水分，减少由于高温下水分气化导致的产品缺陷。烘干后的纤维毡冷却至常温后通过轧机进行压辊轧制，以排出纤维毡内的空气，减少气孔的产生，同时提高纤维毡表面平整度。然后，将纤维毡放入210 ℃的接触式加热烘箱中加热120 s。最后，将加热后的复合材料纤维毡送入框架式伺服液压机中进行压制。压制过程中将液压机的压力吨位设置为30 t，保压时间为2 min。通过控制压板间隙调整板材的厚度，得到厚度为2~4 mm的复合板材，制备的板材样品如图2所示。

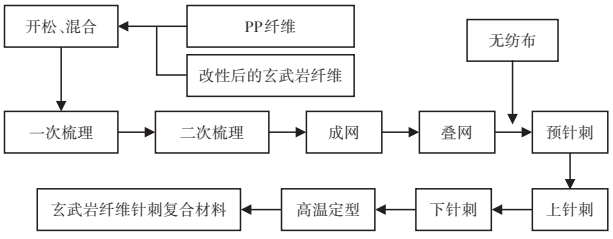


图1 玄武岩纤维复合材料毡的制备工艺流程

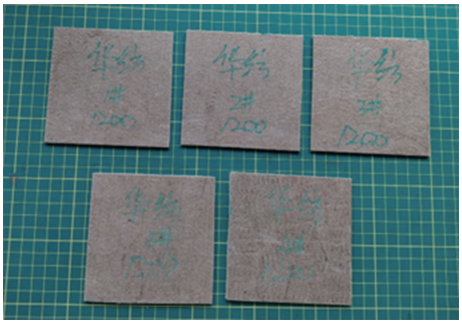


图2 玄武岩纤维复合板材

3 玄武岩纤维复合材料性能表征方法

3.1 拉伸性能测试

玄武岩纤维复合板材的拉伸性能是指在规定的温度、湿度和试验条件下，对试样施加拉伸载荷直至其破坏时所表现出的力学特性，是衡量该复合材料力学性能的重要指标之一。对玄武岩纤维复合板材的横向和纵向拉伸强度进行测试（横向为针刺毛毡宽度方向，纵向为针刺毛毡长度方向）。拉伸试验参考GB/T1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》[19]进行，试验装置采用WDW微机控制电子万能试验机。试样尺寸为长(180 mm)×宽(10 mm)×实际厚度，拉伸速度为10 mm/min，试验结果为5次检测后的平均值。

3.2 弯曲性能测试

参照标准GB/T 9341—2008《塑料弯曲性能的测定》[20]对制备的复合板材进行了弯曲性能测试。试验装置为WDW微机控制电子万能试验机。试样尺寸为长(80 mm)×宽(10 mm)×实际厚度，速度为(2±0.4) mm/min，压头半径为(5±0.1) mm，试验结果为

5次检测后的平均值。

3.3 冲击强度测试

冲击强度通过HIT5.5P冲击试验机(Zwick),参照GB/T1451—2005《纤维增强塑料简支梁式冲击韧性试验方法》[21]进行检测,试样尺寸为长(120 mm)×宽(15 mm)×实际厚度,试验结果为5次检测后的平均值。

3.4 含水量测试

含水量测试参照GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》[22]进行测定,试验装置的型号为HLCS610-X1C400。试验结果为5个样品含水量的平均值。

4 试验结果与讨论

4.1 玄武岩纤维直径对复合材料的影响

为了验证玄武岩纤维直径对复合材料力学性能的影响,分别选取直径为13 μm、15 μm、17 μm的玄武岩纤维和相同的生产工艺制成面密度为1 200 g/m^2、厚度为4 mm的板材,然后对不同直径的玄武岩纤维复合板材进行力学性能和吸水率的检测,检测结果如图3~图6所示。

从图3~图5可以看出,随着纤维直径增加,复合板材的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度均呈下降趋势。纤维直径由13 μm增加至17 μm时,板材横向弯曲强度由32.1 MPa降低至28.7 MPa,纵向弯曲强度由26.7 MPa降低至21.1 MPa,横向拉伸强度由52.3 MPa降低至38 MPa,纵向弯曲强度由36.9 MPa降低至30.3 MPa,冲击强度由221.9 kJ/m^{2}降低至148.2 kJ/m^2。上述变化发生原因可能为纤维直径增大时,玄武岩纤维在复合材料中所占体积减少,PP纤维所占体积增大,而复合材料的力学性能主要通过玄武岩纤维体现,纤维直径减小的效果相当于在单位质量的复合材料中投入更多的纤维,增加了纤维间相互缠绕的概率并增加了纤维之间的连接点,从而使其力学性能提高。此外,板材的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度横向和纵向存在显著差异,其横向强度优于纵向强度,这可能是由于加工过程中采用的交叉铺网工艺,使梳理后的纤网纵横向调换,从而改变了纤网中大部分纤维的取向度。试样的横向纤维与的作用力更大,因此其横向的强度更高。

图6表明,随着纤维直径的增加,复合板材的吸水率为4.85%~4.95%,吸水率较低,纤维直径为13~17 μm时,其变化对复合材料吸水率影响较小。

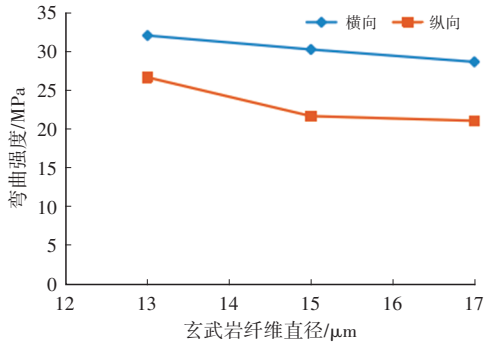


图3 不同纤维直径板材弯曲强度

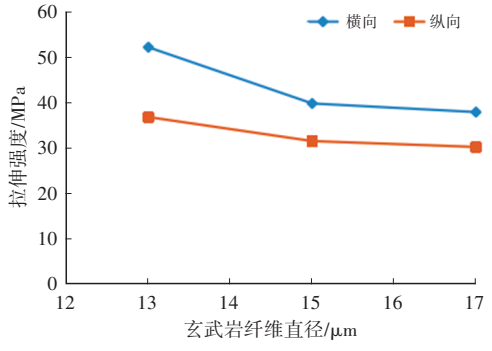


图4 不同纤维直径板材拉伸强度

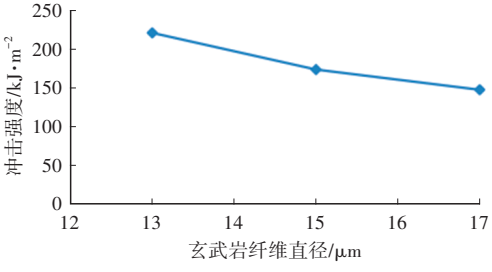


图5 不同纤维直径板材冲击强度

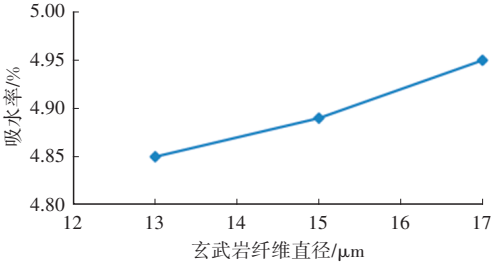


图6 不同纤维直径板材吸水率

4.2 面密度对玄武岩纤维复合材料性能的影响

为了验证不同面密度的复合材料的力学性能,选取了纤维直径为15 μm的玄武岩纤维,制备了厚度为4 mm,面密度分别为800 g/m^2、1 000 g/m^2、1 200 g/m^2、1 400 g/m^2、1 600 g/m^{2}的玄武岩纤维复合板材。然后取样并进行拉伸、弯曲、冲击及吸水性测试。测试结果如图7~图10所示。

图7表明,随着面密度增加,复合板材的弯曲强度呈增大趋势。当面密度由800 g/m^{2}增加至1 600 g/m^{2}时,板材的横向弯曲强度由19.6 MPa增加至34.4 MPa,

纵向弯曲强度由18.1 MPa增加至27.7 MPa。这是因为相同厚度的复合板材，面密度越大的复合板材其内部纤维与纤维之间、纤维与PP之间的结合更加紧密，纤维之间的作用力更大，因此其力学性能更强。

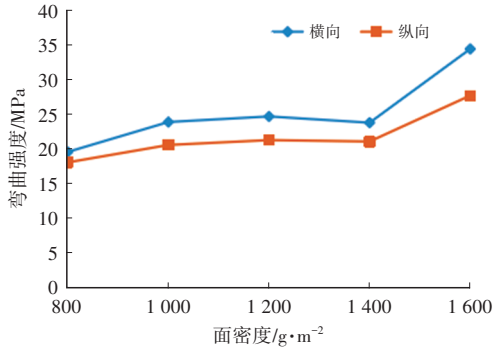


图7　不同面密度玄武岩纤维复合板材弯曲强度

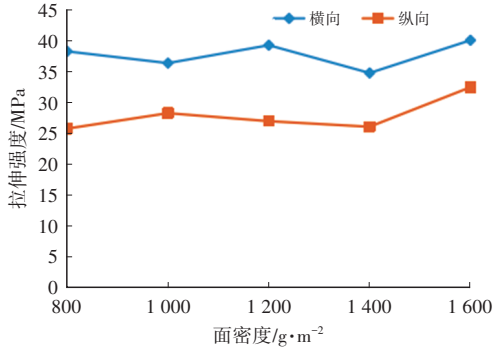


图8　不同面密度玄武岩纤维复合板材拉伸强度

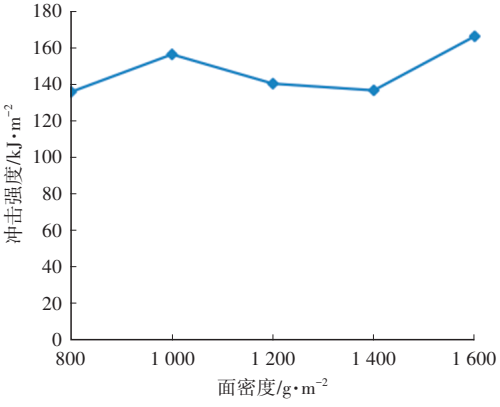


图9　不同面密度玄武岩纤维复合板材冲击强度

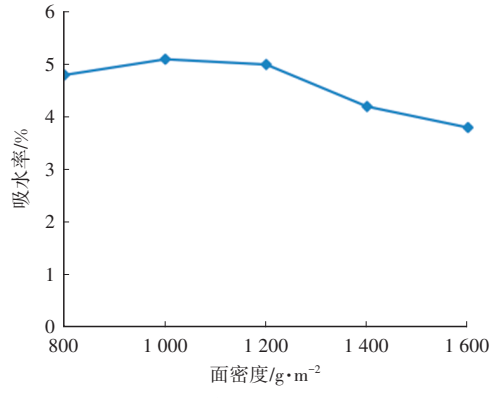


图10　不同面密度玄武岩纤维复合板材吸水率

图8~图9表明，当面密度在1 000~1 200 g/m²范围内变化时，复合板材的拉伸强度和冲击强度相对稳定，其横向拉伸强度维持在38 MPa附近，纵向拉伸强度维持在27 MPa附近，板材冲击强度维持在145 kJ/m²附近。在配方与成型工艺相同的前提下，板材的力学性能对厚度变化的敏感度远高于面密度。当面密度变化未引起板材厚度发生明显变化时，材料内部的结构特征未发生实质性变化，因此其宏观力学性能未表现出明显波动。

图10表明，随着面密度的增加，板材的吸水率呈下降趋势，面密度由800 g/m²增加至1 600 g/m²时，板材吸水率由4.8%降低至3.8%。这是由于在相同厚度下，单位体积内的纤维含量与面密度呈正相关，玄武岩纤维复合板材其内部更为致密，纤维与纤维之间的空隙缩小。同时，玄武岩纤维与PP之间的界面结合更紧密，有效阻断了水分渗透通道，从而抑制了材料的吸水行为。面密度在800~1 600 g/m²范围内的吸水率均满足汽车部件吸水率≤12%的要求。

4.3　板材成型厚度对玄武岩纤维复合材料性能的影响

为了验证厚度对复合材料性能的影响，选取相同直径的玄武岩纤维，制备了相同面密度，厚度分别为2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm的玄武岩纤维复合材料板材，并对其弯曲强度、拉伸强度、冲击强度及吸水率进行了测试，结果如图11~图14所示。

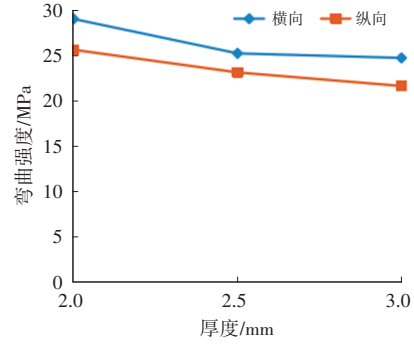


图11　不同厚度玄武岩纤维复合板材弯曲强度

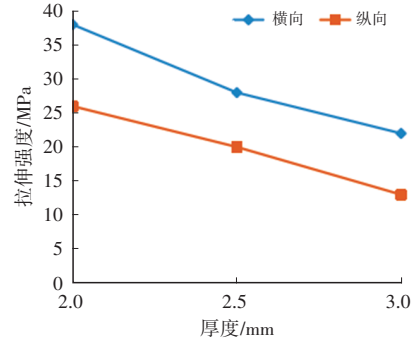


图12　不同厚度玄武岩纤维复合板材拉伸强度

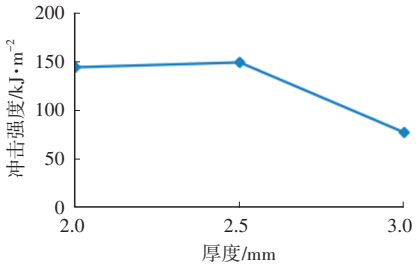


图13　不同厚度玄武岩纤维复合板材冲击强度

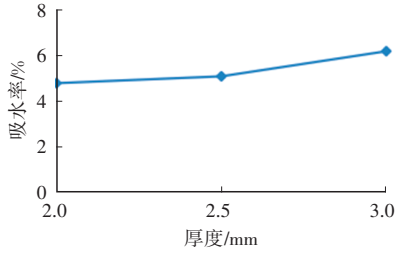


图14　不同厚度玄武岩纤维复合板材吸水率

图11~图13表明，随着复合板材厚度增加，其弯曲强度、拉伸强度、冲击强度均表现出不同程度的下降。板材厚度由2 mm增加至3 mm时，其横向弯曲强度由29 MPa降低至24.7 MPa，纵向弯曲强度由25.6 MPa降低至21.6 MPa，板材的横向拉伸强度由38.1 MPa降低至21.9 MPa，纵向拉伸强度由25.8 MPa降低至13.3 MPa，板材的冲击强度从145.2 kJ/m^{2}降低至78 kJ/m^2。这是由于在相同面密度下，厚度更小的板材单位体积密度更大，纤维与纤维之间、纤维与PP之间的耦合度更高，使其相互作用力更大，因此复合材料具有更高的强度和韧性。

图14表明，复合板材的吸水率随厚度的增加而增加，其厚度由2 mm增加至3 mm时，板材吸水率由4.8%增加至6.2%。这是由于在相同面密度下，厚度越小的玄武岩纤维复合板材更紧实，玄武岩纤维复合板材单位体积上的密度更大，纤维与纤维之间的空隙更少，纤维与PP之间的界面结合更好，水分进入到复合板材的可能性会降低。因此，在同等面密度下，厚度较小的玄武岩纤维复合板材的吸水率较低。

5　结束语

本文制备了不同规格的玄武岩纤维复合板材，并对其进行了拉伸性能、弯曲性能、冲击性能和吸水性的检测。系统分析了纤维直径、纤维毡面密度、板材厚度对复合材料性能的影响，研究结果如下：

（1）通过梳理成网工艺制备的板材，受梳理工艺影响，纤维出现特定的取向，导致板材的横向和纵向有明显差异，其横向的性能均优于纵向。

（2）在相同条件下，玄武岩纤维的直径越小、纤维毡的面密度越大、板材的厚度越小，板材的力学性能越好，其拉伸强度、弯曲强度、冲击强度分别最高可达52.3 MPa、36.9 MPa、222.1 kJ/m^2，能够满足汽车内饰护板类部件对纤维复合板材力学性能的需求。

（3）在相同条件下，纤维毡的面密度越大、板材的厚度越小，板材的吸水率越低，而纤维直径在13~17 μm范围内，其变化对复合材料吸水率影响较小。本文制备的纤维复合板材的吸水率在3.8%~6.2%，能够满足汽车部件吸水率≤12%的要求。

参　考　文　献

[1] 王崇杰, 杨明君, 周松, 等. 玄武岩纤维/聚丙烯复合材料的力学性能与摩擦磨损特性[J]. 塑料工业, 2022, 50(9): 160-167.

[2] 马芳武, 孙昊, 马文婷, 等. 改性玄武岩纤维增强复合材料研究综述[J]. 汽车技术, 2022(10): 1-15.

[3] 张建伟, 余希林, 刘嘉麒, 等. 连续玄武岩纤维新材料的制备,性能及应用[J]. 材料导报, 2023, 37(11): 234-240.

[4] 刘嘉麒. 绿色高新材料——玄武岩纤维具有广阔前景[J]. 科技导报, 2009, 27(9): 3.

[5] MITTAL G, RHEE K Y. Chemical Vapor Deposition-Based Grafting of CNTs Onto Basalt Fabric and Their Reinforcement in Epoxy-Based Composites[J]. Composites Science and Technology, 2018(165): 84-94.

[6] FANG Z Q, HUANG L, HU D X, et al. High-Strength Antibacterial Textiles Using Basalt Fibers Grafted with ZIF-8[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(2): 2394-2400.

[7] TRIPATHY P, BISWAS S. Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fiber Reinforced Epoxy Composites Modified with $CaCO_3$ Nanoparticles[J]. Polymer Composites, 2022, 43(11): 7789-7803.

[8] 李年华, 刘元坤, 崔正浩, 等. 玄武岩纤维的性能及其应用[J]. 合成纤维, 2022, 51(12): 16-23.

[9] 郭昌盛, 杨建忠, 赵永旗. 连续玄武岩纤维性能及应用[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(6): 25-29.

[10] ZHENG Y, SUN D, FENG Q, et al. Nano-SiO_2 Modified Basalt Fiber for Enhancing Mechanical Properties of Oil Well Cement[J]. Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects, 2022(648): 128900.

[11] WANG Z T, LUO H J, ZHANG L, et al. Mechanical Properties of Basalt Fiber Improved by Starch Phosphates Sizing Agent[J]. Applied Surface Science, 2020(521): 146196.

[12] SAASIŃSKA K. The Recyclability of Fire-Retarded Biobased Polyamide 11 (PA11) Composites Reinforced

with Basalt Fibers (BFs): The Influence of Reprocessing on Structure, Properties, and Fire Behavior[J]. Molecules, 2024, 29(13): 3233.

[13] 何宏, 李华冠, 陈书云. 汽车内饰用麻纤维增强PET/PP非织造复合材料的制备与性能研究[J]. 玻璃纤维, 2017(5): 22-26.

[14] 张亮, 廖兰, 何家志, 等. PP玻纤板基模压内饰件异味来源和控制方法研究[J]. 时代汽车, 2022(3): 140-143.

[15] 赖艳, 张得昆. PP/玄武岩纤维针刺土工布制备及性能分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2019, 32(1): 7-11.

[16] 胡舒怡, 张春明. 新材料新工艺在汽车内饰中的应用分析[J]. 西部皮革, 2023, 45(9): 40-42.

[17] 吴剑青, 钟智丽. 玄武岩纤维在汽车行业上的应用前景[J]. 产业用纺织品, 2012(4): 26-28.

[18] 陈云霞, 李志虎. 树脂基纤维复合材料在新能源汽车上的应用[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(15): 102-107.

[19] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S/OL]. (2005-12-01)[2026-06-09]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D77A33D3A7E05397BE0A0AB82A.

[20] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料弯曲性能的测定: GB/T 9341—2008[S/OL]. (2008-08-02) [2026-06-09]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D7F8F6D3A7E05397BE0A0AB82A.

[21] 纤维增强塑料简支梁式冲击韧性 试验方法: GB/T 1451—2005[S/OL]. (2005-05-18) [2026-06-09]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D78016D3A7E05397BE0A0AB82A.

[22] 人造板及饰面人造板理化性能试验方法: GB/T 17657—2022[S/OL]. (2022-12-30)[2026-06-09]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=F159DFC2A86347EFE05397BE0A0AF334.

（责任编辑　**梵玲**）